



**TITULO**

ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA POR FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA DE ACUERDO CON  
EL MÉTODO DE TALUD INFINITO, EN EL MUNICIPIO DE GIRARDOTA EN EL DEPARTAMENTO DE  
ANTIOQUIA

**AUTOR**

LUISA FERNANDA RIVERA CARMONA

**TUTOR**

FELIPE RIAÑO

**PROGRAMA**

ESPECIALIZACIÓN EN GEOMÁTICA

**FACULTAD**

CALLE 100

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA

2017

# **ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA POR FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA DE ACUERDO CON EL MÉTODO DE TALUD INFINITO, EN EL MUNICIPIO DE GIRARDOTA EN EL DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA**

**ZONING OF THE THREAT BY MASS REMOVAL PHENOMENA IN ACCORDANCE WITH  
THE TALUD INFINITO METHOD IN THE MUNICIPALITY OF GIRARDOTA IN THE  
DEPARTMENT OF ANTIOQUIA**

Rivera Carmona Luisa Fernanda

Ingeniera Civil

Universidad Militar Nueva Granada

Bogotá, Colombia

[lriviera\\_carmona@hotmail.com](mailto:lriviera_carmona@hotmail.com)

## **RESUMEN**

Este proyecto corresponde a un estudio de fenómenos de remoción en masa regional del municipio de Girardota Antioquia, empleando la metodología de Talud Infinito y simulaciones de Montecarlo, para determinar el factor de seguridad (estabilidad del terreno) en cualquier punto de la zona de estudio, utilizando herramientas de Sistema de información geográfica y de geoestadística, para su cálculo, espacialización de variables y resultados.

Los fenómenos de remoción en masa son comunes en el territorio nacional debido a la topografía, precipitaciones y zonas con alto grado de sismicidad, en especial en el departamento de Antioquia debido a su compleja topografía, uno de los municipios más afectados por este tipo de fenómenos corresponde a Girardota, ubicado al norte del departamento; el poder contar con una espacialización de las condiciones de estabilidad del terreno por diferentes métodos, permite generar alertas tempranas,

con el fin de prevenir el aumento de este tipo de fenómenos y desarrollar planes para la gestión del riesgo.

Por lo antes mencionado, el cálculo del talud infinito se realizará por unidad de pixel, obteniendo resultados de iguales unidades, utilizando insumos de uso público generados por las entidades encargadas, como lo son modelo digital del terreno y geología.

De acuerdo con lo anterior, los resultados permitirán tener el estudio correspondiente a una espacialización de los factores de seguridad, categorizados según la Guía Metodológica para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa (Servicio Geológico Colombiano, 2015), el cual permitirá la zonificación de la amenaza por fenómenos de remoción en masa para el municipio de Girardota.

Una vez realizada la modelación de estabilidad de taludes para el municipio de Girardota en el departamento de Antioquia, se encontró que la zona de estudio presenta amenaza por fenómenos de remoción en masa, de igual manera el área urbana también presenta amenaza por en la parte sur, es importante que su zona de expansión se plantee hacia la parte norte la cual no presenta amenaza.

Palabras clave: Talud, estabilidad, amenaza, riesgo

### **ABSTRACT**

This project corresponds to a study of regional mass removal phenomena in the municipality of Girardota Antioquia, using the Infinity Talent methodology and Monte Carlo simulations to determine the safety factor (terrain stability) at any point in the study area, Using geographic information system and geostatistics tools, for their calculation, spatialization of variables and results.

The mass removal phenomena are common in the national territory due to topography, precipitation and areas with high seismicity, especially in the department of Antioquia due to its complex topography, one of the municipalities most affected by this type of phenomena Corresponds to Girardota, located to the north of the department; Being able to have a spatialization of the conditions of stability of the land by different methods, allows to generate early warnings, in order to prevent the increase of this type of phenomena and to develop plans for the risk management.

Due to the aforementioned, the calculation of the infinite slope will be realized per unit of pixel, obtaining results of equal units, using inputs of public use generated by the entities in charge, as they are digital model of the terrain and geology.

According to the above, the results will allow the study of a spatialization of the safety factors, categorized according to the Methodological Guide for Studies of Threat, Vulnerability and Risk of Mass Movements

(Servicio Geológico Colombiano, 2015), which will allow The zoning of the threat by phenomena of mass removal for the municipality of Girardota.

After the modeling of slope stability for the Girardota municipality in the department of Antioquia, it was found that the study area is threatened by mass removal phenomena, in the same way the urban area is also threatened by the southern part , It is important that its expansion zone is raised towards the north which is not threatened.

Keywords: Slope, stability, threat, risk

## **INTRODUCCIÓN**

En el territorio de Colombia se presentan de forma continua y a gran escala procesos de remoción en masa, esto se debe a efectos detonantes como altas precipitaciones y condiciones de sismicidad extrema.

En el caso del municipio de Girardota en el departamento de Antioquia, tiene antecedentes a procesos constantes de remoción en masa debido a su topografía compleja y altas precipitaciones presentadas en los últimos tiempos debido al fenómeno de la niña.

En relación con lo anterior, la inestabilidad del terreno no solo se presenta por las condiciones detonantes, sino también a la estructura del suelo y su calidad. Teniendo en cuenta todas las variables que permiten que se presenten los fenómenos de remoción en masa, es necesario conocer una zonificación a escala regional de este tipo de eventos.

Por otro lado, el territorio de Colombia cuenta con una zonificación regional de amenaza por fenómenos de remoción, pero es importante calcularla por diferentes métodos (cuantitativos o cualitativos) y escenarios, para así contar con diferentes fuentes, con el fin de promover el buen uso de la tierra, gestionar los planes de ordenamiento territorial, prevenir asentamientos humanos en zonas críticas, desarrollar estudios de detalle en zonas de alta amenaza, promover la gestión del riesgo, entre otros.

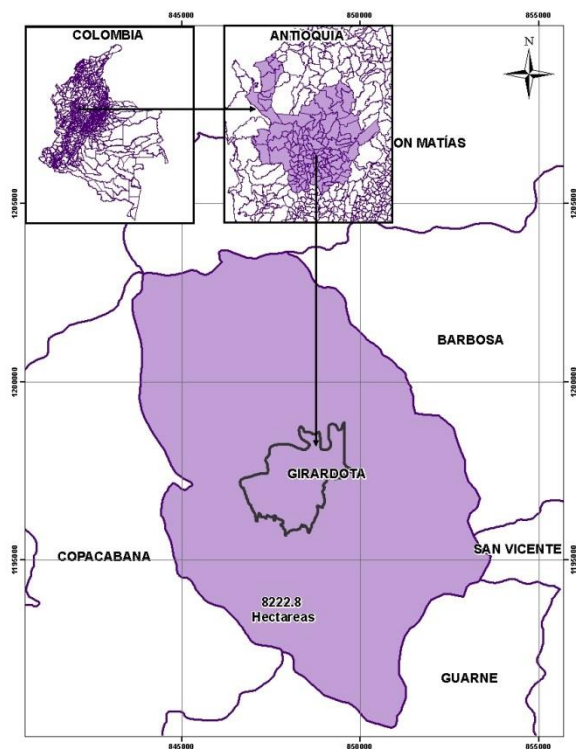
Por último, para realizar la zonificación de la amenaza por fenómenos de remoción en masa se cuenta con el mapa geológico realizado por el Servicio Geológico Colombiano y el modelo

digital del terreno desarrollado por ALOS a escala 1:25.000. La zonificación es viable realizarla ya que se cuenta con los insumos básicos y herramientas para zonificar la amenaza.

La metodología aplicada es la de Talud infinito modificada con Simulaciones de Montecarlo, con el fin de disminuir la incertidumbre en los resultados obtenidos.

## **1. ZONA DE ESTUDIO**

Girardota es un Municipio de Colombia el cual se encuentra ubicado en el departamento de Antioquia, hace parte del área urbana de Medellín, cuenta con una extensión de 8222.8 hectáreas. Limita por el norte con San Pedro de los Milagros y Don Matías, por el oriente con Barbosa, en el sur con San Vicente y Guarne, y por el occidente con Copacabana



**Ilustración 1 Ubicación de la zona de estudio**

## **2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Se han realizado diferentes estudios de caso para la remoción en masa en diferentes puntos, como:

Zonificación a escala grande de amenazas por fenómenos de remoción en masa, empleando la herramienta del SIG (Alzate A., Guevara, & Valero M., 1999), este artículo de investigación tomó como caso de estudio la localidad de Usme en la ciudad de Bogotá, empleando el cálculo de talud infinito, pero realizando modificaciones a la zonificación de la amenaza por fenómenos de remoción en masa, de acuerdo con la cobertura del suelo y a la forma del terreno, como conclusiones el artículo presenta una confiabilidad del 90%, en virtud de la escala en detalle establecida corroborando estudios realizados en campo.

Por otra parte, en México se adelantaron estudios relacionados con fenómenos de remoción en masa en el poblado de Zapotitlán de Méndez, Puebla: relación entre litología y tipo de movimiento (Capra, Lugo-Hubp, & Dávila-Hernández, 2003), su principal aporte corresponde a relacionar los tipos de suelo presente, con la susceptibilidad que tiene el mismo en la remoción en masa. Como limitante no establece una zonificación especial, pero define a las Lutitas como el material más susceptible a presentar procesos de remoción en masa.

Del mismo modo en México, se realizó una pesquisa sobre “Precipitaciones Extremas y sus Implicaciones en Procesos de Remoción en Masa en la Planificación Urbana de Tampico, México” (Sánchez González, 2011), enfocándose principalmente en las precipitaciones extremas presentadas en la zona a lo largo de un año, desatando procesos de remoción en masa, afectando elementos expuestos además de vidas humanas. La espacialización y categorización de la amenaza es realizada por criterios de clasificación (método cualitativo), como: la pendiente, la morfología, litología y uso del suelo. Deja planteado como reto a futuro, desarrollar investigaciones sobre evaluación y zonificación de la amenaza por fenómenos de remoción por medio de métodos cuantitativos y cualitativos para diferentes lugares afectados por este tipo de procesos.

Finalmente, se revisó la pesquisa “Zonificación del peligro de remoción en masa en las zonas urbanas según método de análisis Mora y

Vahrson: Estudio de caso” en Pamplona (Colombia) (Rodriguez Solano, Quintana Cabeza, Rivera Alarcon, & Mosquera Tellez, 2013), se calcula la amenaza por el método de Mora y Vahrson, el cual consiste en realizar estudio heurístico o algebra de mapas, teniendo en cuenta las variables de relieve relativo, litología, humedad del suelo, sismicidad y la intensidad de la precipitación. Aunque presenta una zonificación de la amenaza no existe correlación con los resultados en la aplicación de la metodología.

¿Qué zonas se encuentran en amenaza por fenómenos de remoción en masa, según el método de talud infinito en el municipio de Girardota, para la identificación de las zonas en riesgo?

### **3. METODOLOGÍA**

#### **3.1 FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA**

Los fenómenos de remoción de acuerdo con (González de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002) son “movimientos de masas de suelo o roca que se deslizan, moviéndose relativamente respecto al sustrato, sobre una o varias superficies de rotura netas al superarse la resistencia al corte de estas superficies; la masa generalmente se desplaza en conjunto, comportándose como una unidad en su recorrido” es decir, en el caso del material deslizado que cuenta con una pérdida de estabilidad y con una saturación de poros lo cual genera un flujo a lo largo de la ladera alcanzando velocidades elevadas.

Por lo anterior, son objetivos de análisis las condiciones de estabilidad en las distintas estructuras de contención como taludes naturales y artificiales, la seguridad y funcionalidad del diseño y la elaboración del plano de amenaza a los deslizamientos, se realiza por modelación matemática de los mismos.

Para el cálculo de estabilidad de taludes existe diferentes métodos, entre ellos se destaca el de talud infinito, el cual corresponde al material inestable que posee una capa de espesor constante y pequeña respecto a la altura del talud, y así mismo, se supone que presenta una continuidad infinita lateralmente. En estas condiciones, la mayoría de la masa del talud se mueve aproximadamente en forma paralela a la superficie topográfica. Esta inestabilidad se da generalmente en materiales poco o nada cohesivos y se encuentra dada por algún movimiento geológico como una capa de roca (Santoso, Phoon, Asce, & Quek, 2009).

#### **3.2 MÉTODO DE TALUD INFINITO**

El método del talud infinito supone que cualquier tamaño de la columna de suelo es representativo de todo el largo del talud con una capa delgada de suelo. Adicionalmente, el método supone un suelo isotrópico y homogéneo (Ozelim, Cavalcante, Pacheco de Assis, & Ribeiro, 2013).

Para el método el desarrollo, los efectos de borde son despreciables y el factor de seguridad se puede calcular a partir de la unidad de área con base en el criterio Mohr-Coulomb. Esto se debe a que el mecanismo de falla no es muy

profundo y el talud es uniforme y relativamente largo (Suarez Díaz, 2009).

$$F.S = \frac{c + (\gamma_s z_w - \gamma_w h) \cos^2 \beta \tan \Phi'}{\gamma z \sin \beta \cos \beta}$$

Donde

$c$ , cohesión del suelo (KN/m3)

$\gamma_s$ , peso unitario total del suelo (KN/m3)

$\gamma_w$ , peso específico del agua (KN/m3)

$h$ , espesor del estrato (m)

$z_w$ , nivel freático (m)

$\beta$ , pendiente del talud (°)

$\Phi'$ , ángulo de fricción (°)

### 3.3 SIMULACIONES DE MONTECARLO

Por otra parte, estas simulaciones corresponden a un método que permite considerar todas las posibles combinaciones, interrelaciones y escenarios que puedan existir en una situación de estudio. La simulación incluye la distribución de probabilidad de las variables críticas y de esta forma tiene la capacidad de generar un histograma que refleja la proyección y medición de la incertidumbre (Bravo Mendoza & Sánchez Celis, 2012).

Finalmente, el objetivo de la simulación es reproducir las condiciones reales a partir de la utilización de un método matemático que permita analizar las propiedades y

características de la situación estudiada, para así poder conocer los posibles resultados que sirven como base para la toma de decisiones (Bravo Mendoza & Sánchez Celis, 2012)

## 4. PROCEDIMIENTO Y RESULTADOS

1. Determinación de los parámetros geológicos geotécnicos a las unidades de geología presentes en la zona de estudio (espesor, cohesión, fi, peso específico), tomando como base valores teóricos del libro de (González de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002) y teniendo en cuenta las unidades del shape de Geología para Colombia escala 1:100.000

**Tabla 1 Espesor promedio de las unidades geomorfológicas presentes en la zona de estudio**

Unidades Geológicas	Altura (m)
	Valor
Neis de la Ceja	1
Anfibolitas de Medellín	2
Batolito antioqueño facies normal	2
Depósitos aluviales	2
Depósitos de vertiente	2

**Tabla 2 Peso específico de las unidades geomorfológicas presentes en la zona de estudio**

Unidades Geológicas	Peso específico del suelo y (KN/m <sup>3</sup> )	
	Mín. Valor	Máx. Valor
Neis de la Ceja	12.5	19.5
Anfibolitas de Medellín	22	27
Batolito antioqueño facies normal	14.5	22
Depósitos aluviales	14.5	21
Depósitos de vertiente	7	15



**Tabla 3 Angulo de fricción de las unidades geomorfológicas presentes en la zona de estudio**

Unidades Geológicas	Ángulo de fricción $\Phi$ (grados)		
	Mín.	Promedio	Máx.
Neis de la Ceja	28	32	34
Anfibolitas de Medellín	35	40	42
Batolito antioqueño facies normal	33	35	40
Depósitos aluviales	30	32	34
Depósitos de vertiente	25	28	30

**Tabla 4 Cohesión de las unidades geomorfológicas presentes en la zona de estudio**

Unidades Geológicas	Cohesión C(KN/m <sup>2</sup> )		
	Mín.	promedio	Máx.
Neis de la Ceja	2	4	6
Anfibolitas de Medellín	15	20	25
Batolito antioqueño facies normal	3	5	8
Depósitos aluviales	2	3	4
Depósitos de vertiente	1	3	5

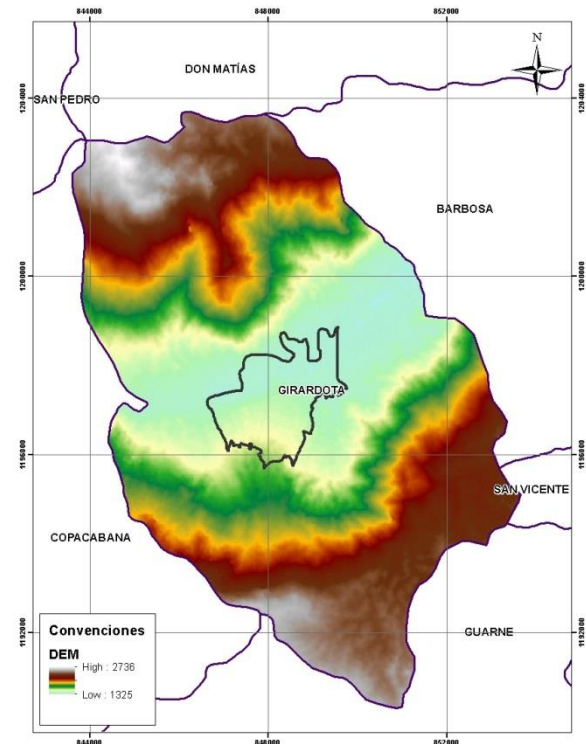
- Elaboración del mapa de pendientes a partir del modelo digital del terreno, utilizando el software ArcGIS 10.4, tomando como insumo el DEM de ALOS.

El Satélite ALOS es japonés, el cual se basa en observación terrestre que captura imágenes estereoscópicas, multiespectrales y de Radar, las cuales permiten generar modelos de elevación digital del terreno.

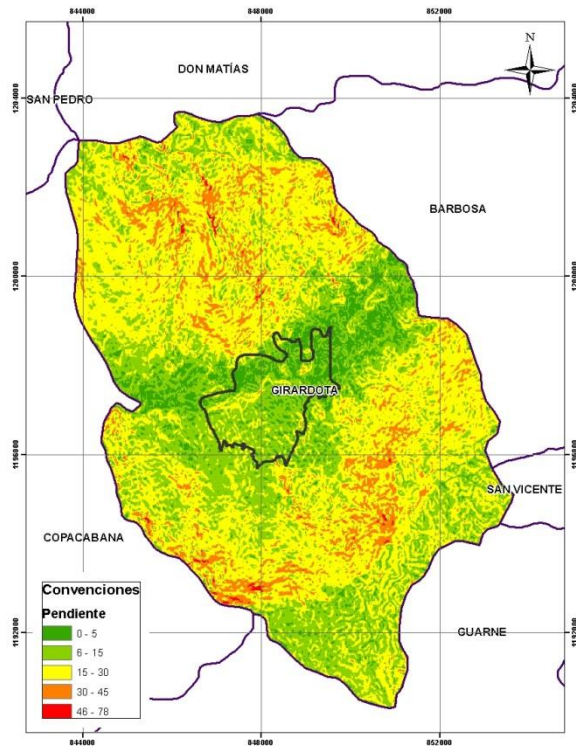
La información de ALOS es de acceso público y gratuito, lo que permite que se puedan realizar diferentes tipos de análisis a la superficie terrestre sobre las imágenes

y sus derivados.

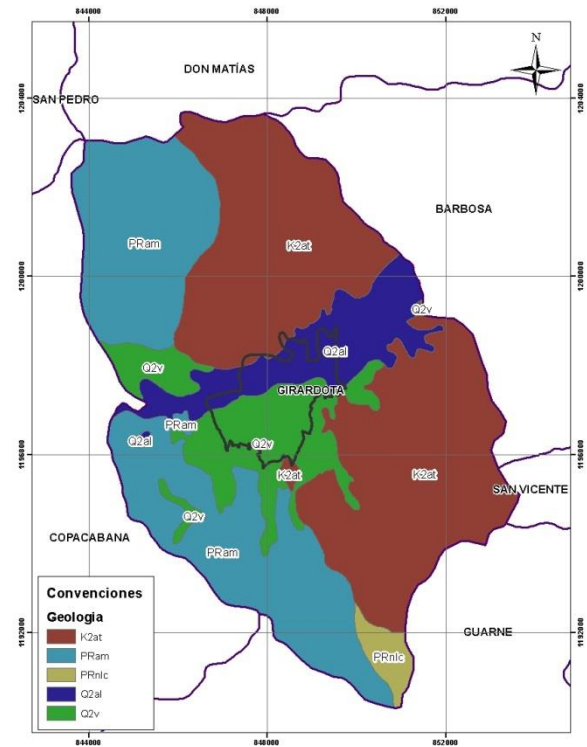
El mapa de pendientes, calcula la pendiente de la ladera, se define como el ángulo existente entre la superficie del terreno y la horizontal.



**Ilustración 2 DEM de la zona de estudio**



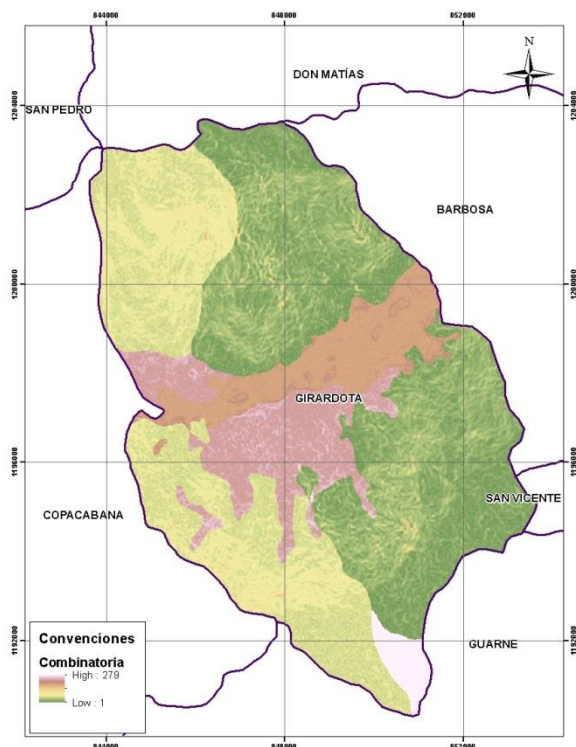
**Ilustración 3** Mapa de pendientes de la zona de estudio



**Ilustración 4** Mapa de geología de la zona de estudio  
Fuente: (Servicio Geológico Colombiano, 2015)

3. A partir del mapa de geología realizado para toda Colombia por el Servicio Geológico Colombiano, de uso público y descarga gratuita el cual se toma a partir de formato shape o polígono, se realiza la conversión a formato raster o unidades e pixel, esto con el fin de realizar un análisis pixel a pixel con las demás variables que conforman la fórmula de Talud Infinito.

4. En el software Arcgis 10.4 se realiza una combinatoria (corresponde a la ordenación y agrupación de un determinado número de elementos) entre la geología y el mapa de pendientes, ya que esto permite tener información de la unidad y pendiente para cada unidad de pixel.



**Ilustración 5** Mapa de combinación de variables de la zona de estudio

5. Una vez se tiene la combinación entre los mapas de geología y pendiente, se asigna los valores de las Tabla 1, Tabla 2, Tabla 3 y Tabla 4, para cada una de las unidades de geología.
6. Para la implementación de las Simulaciones de Montecarlo en el método de Talud Infinito, fue necesario crear una rutina en el software R, esto permitió que a la ecuación trabajada, se le asignaran diferentes valores y distribuciones a las variables, con el fin de simularlo 10.000 veces para obtener resultados con una menor incertidumbre.

Esta rutina y las simulaciones son el factor adicional de este estudio, la fórmula de Talud infinito es aplicada pero al realizarla

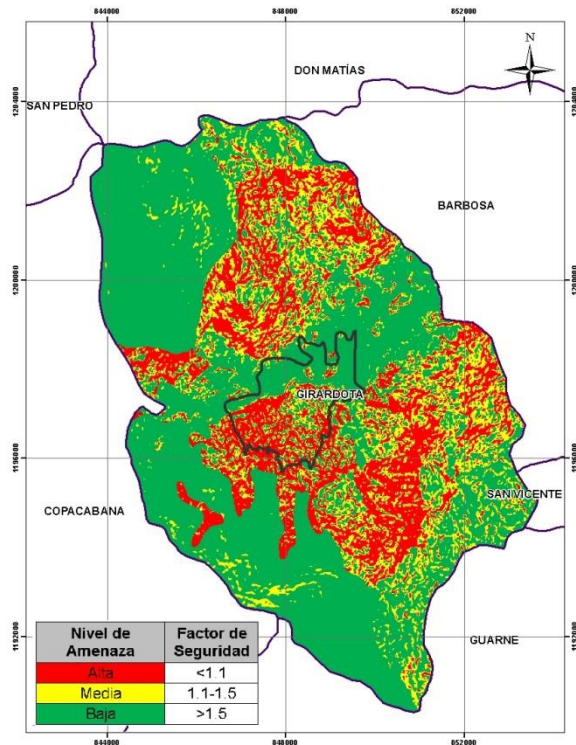
con las simulaciones de Monte Carlo hace que se disminuya el error en los resultados y se incremente su confianza.

7. Una vez se obtuvieron los factores de seguridad para cada una de las unidades de pixel, se procedió a realizar la espacialización de dichos factores y categorización de la amenaza de acuerdo a la Guía Metodológica para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa (Servicio Geológico Colombiano, 2015) como se presenta en la Tabla 5.

**Tabla 5** Niveles de amenaza categorizados de acuerdo con el factor de seguridad

Nivel de Amenaza	Factor de Seguridad
Alta	<1.1
Media	1.1-1.5
Baja	>1.5

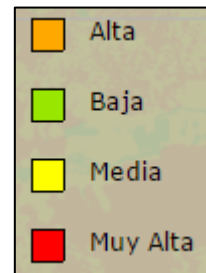
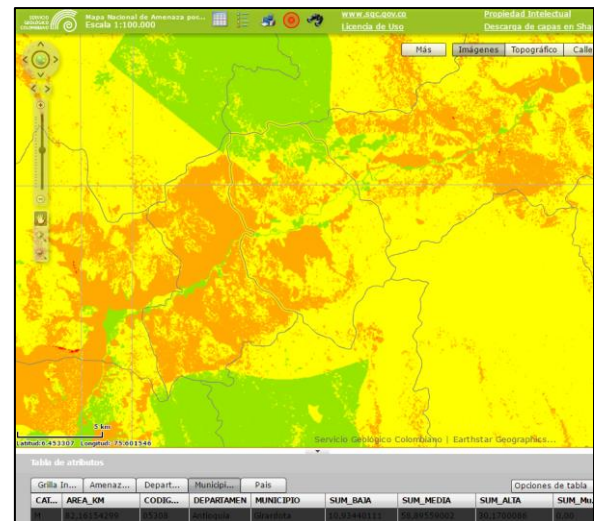
La obtención del mapa de amenaza por fenómenos de remoción en masa se realizó tomando como nivel medio la saturación del suelo.



**Ilustración 6** Mapa de amenaza por remoción en masa escenario medio de la zona de estudio

La zona de estudio presenta amenaza alta por fenómenos de remoción en masa en las zonas de altas pendientes y unidades geológicas de baja cohesión y ángulo de fricción, lo que hace que la unidad presente estabilidad.

- Análisis de resultados obtenidos y comparación con el mapa existente de Amenaza por Fenómenos de Remoción en Masa para Colombia



**Ilustración 7** Mapa de Amenaza por remoción en masa para Colombia. Fuente: (Servicio Geológico Colombiano, 2015)

En comparación con el mapa existente de amenaza por fenómenos de remoción en masa desarrollada por el Servicio Geológico Colombiano SGC, y la amenaza calculada en este estudio, se identifica que si existe amenaza por este evento, pero en mapa del SGC se aprecian unidades más grandes de amenaza, y no presenta zonas en amenaza baja.

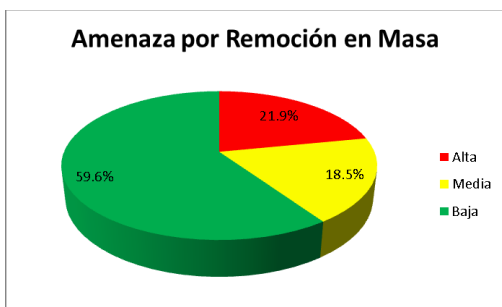
Esto es debido a que la elaboración del mapa del SGC fue realizado a una escala más baja (menor detalle) y como resultado se generalizó la amenaza en el área total.

Como se presenta en la Tabla 6 e Ilustración 8, el 21.9% de la zona de estudio se encuentra en categoría de amenaza alta, el 18.5% en

categoría de amenaza media y por último el 59.6% en categoría de amenaza baja. Resultados los cuales indican que gran parte del municipio se encuentran en amenaza y no es recomendable realizar expansiones urbanas en zonas de amenaza alta y media, además de desarrollar planes para la gestión del riesgo.

**Tabla 6 Porcentajes de amenaza por remoción en masa para el área de estudio**

Amenaza por Remoción en Masa	% de Área
Alta	21.9%
Media	18.5%
Baja	59.6%
Total	100.0%



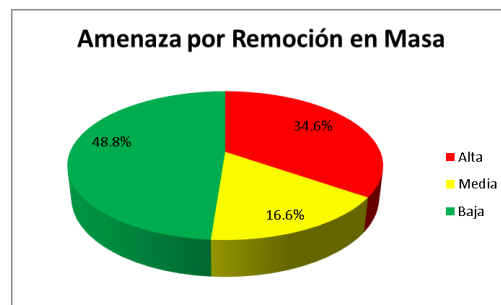
**Ilustración 8 Porcentajes de amenaza por remoción en masa para el área de estudio**

Por otra parte en la Tabla 7 e Ilustración 9, se muestran los porcentajes del área urbana en amenaza alta (34.6%), media (16.6%) y baja (48.8%), lo cual indica que se ha realizado la expansión urbana inadecuadamente, además que se deben desarrollar planes para la mitigación del riesgo en la zona.

**Tabla 7 Porcentajes de amenaza por remoción en masa para el área urbana**

Amenaza por Remoción en Masa	% de Área
Alta	34.6%
Media	16.6%

Amenaza por Remoción en Masa	% de Área
Baja	48.8%
Total	100.0%



**Ilustración 9 Porcentajes de amenaza por remoción en masa para el área urbana**

## 5. CONCLUSIONES

Para la generación del modelo de estabilidad del terreno y el mapa de amenaza fue necesario realizar diferentes pruebas del análisis de talud infinito mediante simulaciones de Montecarlo con el fin de calibrar los parámetros y el modelo de estabilidad.

El mapa de amenaza por movimientos en masa predice la ocurrencia de eventos futuros siempre y cuando ocurran bajo las mismas circunstancias y a causa de las mismas circunstancias que los causaron en el pasado como la inestabilidad del terreno, como lo hacen todos los modelos probabilísticos.

Se puede asumir que los factores geológicos (litología y estructura) no cambiarán significativamente para un periodo geológico corto. Pueden existir modificaciones en la morfología debido a erosión, acciones humanas; sin embargo, no se espera que ocurran cambios morfológicos extensos sobre la zona de estudio.



Los factores detonantes considerados – lluvia - afectan directamente la estabilidad del terreno dado que disminuyen su factor de seguridad promedio y aumentan la probabilidad de ocurrencia de los fenómenos de remoción en masa.

Las simulaciones en el software R son el factor adicional de este estudio, la fórmula de Talud infinito es aplicada pero al realizarle simulaciones de Monte Carlo hace que se disminuya el error en los resultados y se incremente su confianza.

Los resultados indican que gran parte del municipio y del área urbana se encuentran en amenaza y no es recomendable realizar expansiones urbanas en zonas de amenaza alta y media, además se considera desarrollar planes para la gestión del riesgo como evitar expansiones no autorizadas, obras estructurales, obras no estructurales y reasentamientos, con el fin de disminuir el riesgo en el municipio.

## REFERENCIAS

- Alzate A., B., Guevara, C., & Valero M., J. (1999). Zonificación a escala grande de amenazas por fenómenos de remoción en masa, empleando la herramienta del SIG. *Cuadernos de Geografía*, 147-167.
- Bravo Mendoza, Ó., & Sánchez Celis, M. (2012). *Gestión Integral de Riesgos. Cuarta Edición*. Bogotá, D. C.: Bravo y Sánchez, EU.
- Capra, L., Lugo-Hubp, J., & Dávila-Hernández, N. (2003). Fenómenos de remoción en masa en el poblado de Zapotitlán de Méndez, Puebla: relación entre litología y tipo de movimiento. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 95-106.
- González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN.
- Ozelim, L., Cavalcante, A., Pacheco de Assis, A., & Ribeiro, L. (2013). Analytical Slope Stability Analysis Based on Statistical Characterization of soil primary properties. *Int. J. Geomech*, 1943-5622.
- Rodriguez Solano, J., Quintana Cabeza, C., Rivera Alarcon, H., & Mosquera Tellez, J. (2013). Zonificación del peligro de remoción en masa en las zonas urbanas según método de analisis Mora y Vahrson: estudio de caso. *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo*.
- Sánchez González, D. (2011). Precipitaciones Extremas Y Sus Implicaciones En Procesos De Remoción En Masa En La Planificación Urbana De Tampico, México. 135-159.
- Santoso, A., Phoon, K.-K., Asce, F., & Quek, S.-T. (2009). Reliability Analysys of infinite Slope using subset simulation. *Contemporary Topictd in Situ testing, Analysis, and Reliability of Foundations*, 278-285.
- Servicio Geológico Colombiano. (2015). *Guía Metodológica para estudios de amenaza, Vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa*.

Suarez Díaz, J. (2009). Deslizamientos. . En  
*Análisis Geotécnico Vol. 1 Capítulo 4.*  
*Análisis de Estabilidad.* Bucaramanga,  
Colombia: U.I.S Escuela de Filosofía.